

Ebben a részben a kozmogónia rövid tudománytörténeti bevezetését követően a bolygók keletkezésének elméletét, azok sikereit és egyelőre nyitott kérdéseit mutatjuk be. Kitérünk a bolygók és protoplanetáris korongjuk között létrejövő kölcsönhatásokra, amelyek befolyásolják a bolygórendszerek végleges szerkezetét.

A ködhipotézis születése

A kozmogónia – a Világegyetem kialakulását kutató tudományág – gyökerei a reneszánsz, sőt az ókori görög filozófusok munkásságáig nyúlnak vissza. *Anaxagórasz* (i. e. 5. sz.) feltevése szerint az égitestek a teret kitöltő ősi ködben születtek, mozgásukat egy alapvető erő okozza. A római költő és filozófus, *Lucrétius* (i. e. 1. sz.) szerint a Föld a nehezebb elemek központban történő kondenzációjából született, az éter a perifériára szorult legkönnyebb elemből, míg a Nap, a Hold és a csillagok a kettő között elterülő tér részben keletkeztek.

René Descartes (17. sz.) a görög filozófusok elképzelését követve azt feltételezte, hogy a csillagok egy örvény középpontjában keletkeznek, és később bolygókká vagy üstökösökké válhatnak. Az isteni erő által rájuk kényszerített mozgás következtében a nehezebb testek spirális pályán az örvény középpontja felé vándorolnak.

Emanuel Swedenborg (18. sz.) svéd természetkutató Descartes örvényhipotézisét továbbfejlesztve felismerte, hogy a Naprendszer égitestjeinek közös eredete kell, hogy legyen, magyarázva azok fizikai tulajdonságait, illetve mozgásuk okát. Hipotézise szerint a bolygók a Napból dobódtak ki, és az örvénnyel történő kölcsönhatásuk következtében egyre távolabb, jelenlegi pályáikra sodródtak.

Immanuel Kant (18. sz.) *Newton* tömegvonzási törvényét alapul véve olyan hipotézist dolgozott ki, amelyben a Világegyetem és a Naprendszer születését összekapcsolta. Feltevése szerint a galaxisok csillagai a Világot kitöltő végtelen ősi ködből kondenzálódtak. Kant azt gondolta, hogy a Naprendszer keletkezésében is hasonló erők játszottak szerepet. A Nap, az akkor ismert hat bolygó és holdjai, valamint az üstökösök, csakúgy, mint a csillagok, ugyanabból az ősi ködből jöttek létre.

A 18. század végén *Pierre Simon de Laplace* Kant munkásságát nem ismerve alkotta meg a ma ködhipotézisnek nevezett elképzelést. Eszerint a forró, fiatal Napot a jelenlegi bolygópályákon is túlnyúló atmoszféra vette körül, amelyből a Naprendszer bolygói kondenzáció

révén alakultak ki. A bolygók holdjai pedig az éppen kondenzálódó bolygó körül, azonos módon keletkeztek. A 20. század közepén megszületett modern bolygókeletkezési elméletek lényegében Laplace és Kant ködhipotézisét fogalmazzák meg kvantitatív módon.

Modern bolygókeletkezési elméletek

Ma azt gondoljuk, hogy a csillagok a csillagközi térben levő molekulafelhők összeomlásakor, azok középpontjában jönnek létre. A protocsillagot körülvevő felhő tovább zsugorodik és az impulzusmomentum megmaradása következtében egy vékony koronggá lapul, amelyet *protoplanetáris korongnak* nevezünk. A protoplanetáris korongot 99% gáz (túlnyomórészt hidrogén) és csupán 1%-nyi por (jellemzően mikrométeres nagyságú, a csillagszéllel kifúj, főleg szilíciumkristályokból álló szilárd szemcsék) alkotja. A korongbeli gáz vertikális sűrűségeloszlása Gauss-profil követ (a korong síkjában sűrűbb, arra merőlegesen egy ritka korongatmoszféra alakul ki), míg radiális irányban sűrűségeloszlása

$$\Sigma \sim R^{-n}$$

alakú, ahol $-1,5 < n < -0,5$.

A bolygókeletkezés *gravitációs instabilitási* elmélete szerint a csillag keletkezésében szerepet játszó gravitációs kontrakció ismétlődik meg a protoplanetáris korongban. Mindössze százezer év alatt létrejönnek az óriás gázbolygók, amelyek gravitációs vonzásuk miatt nagy mennyiségű port gyűjtenek, létrehozva azok szilárd magját. A Föld-szerű bolygók keletkezése talán azzal magyarázható, hogy a kezdetben hatalmas gázköppennyel burkolt óriásbolygók a csillaghoz közel kerülve elvesztik légkörük jelentős részét.

Ahhoz, hogy egy anyagcsomó gravitációsan instabilá váljon és elkezdjen összeomlani, az kell, hogy saját gravitációs vonzása nagyobb legyen, mint a központi csillagé. Kvalitatíve azt mondhatjuk, hogy a protoplanetáris korong akkor válik gravitációsan instabilá, ha

$$Q = \frac{c_s}{\pi G \Sigma} < 1$$

(*Alar Toomre* 1964-es munkája alapján Toomre-kritérium), ahol c_s a hangsebesség, Σ pedig a gáz felületi sűrűsége.

A sűrűsödő gáz felmelegedése meggátolja annak további összehúzódását. Ahhoz, hogy egy bolygó kialakulhasson, a gáznak gyorsan kell hűlnie, viszont a korong gravitációs instabilitását okozó nagy sűrűség ez ellen dolgozik. Az az elegendően nagy tömegű protoplanetáris korong, amelyik már gravitációsan instabil,

A szerző köszönetét fejezi ki *Szabados Lászlónak* a kézirat gondozásáért és *Ublár Karolának* a cikk szövegének tökéletesítéséért.

túl nagy tömegű ahhoz, hogy hatékonyan tudjon hűlni. Az elmélet kvantitatív vizsgálata során arra a következtetésre jutunk, hogy a bolygók ily módon csak a csillagtól elképesztően nagy távolságra (> 40 CSE) tudnak kialakulni, kérdésessé téve a folyamat létrejöttét az olyan bolygórendszerekben, mint a Naprendszer.

Viktor Szafronov 1969-ben publikált könyvében a Naprendszer keletkezését a protoplanetáris korongban keringő 1%-nyi apró porszemcsék ütközése és összetapadása során bekövetkező, közel 12 nagyságrendet átfogó méretnövekedés segítségével magyarázza. Bár Szafronov munkássága könyvének megjelenése után csak fél évtizeddel vált ismertté, a ma széles körben elfogadott bolygókeletkezési elmélet, az úgynevezett *bolygómag-akkréciós* elmélet alapjait ez teremtette meg. Az elmélet szerint a Föld-szerű kőzetbolygók és az óriásbolygók meglehetősen összetett folyamat során keletkeznek, amelynek főbb fázisai a következők:

1. A por növekedése során a mikrométeres szemcsék összetapadnak és milli- vagy centiméteres méretű agglomerátumokat alkotnak.

2. Az agglomerátumok ütközése során a méretnövekedés tovább folytatódik, és kialakulnak a kilométeres planetezimálok.

3. A planetezimálok, gravitációs vonzásuknak köszönhetően egybeolvadnak és kialakulnak a bolygócsírák, amelyek további ütközéseik révén Föld-szerű kőzetbolygókká növekednek.

4. Az elegendően nagy tömegű kőzetbolygók hatalmas gázköpenyt gyűjtenek, és kialakulnak az óriásbolygók.

A porszemcsék növekedése

A protoplanetáris korongbeli por szemcséi kezdetben a Kepler-törvény szerinti körsebességgel, míg a gáz ennél lassabban kering a csillag körül. Az utóbbi jelenség oka az, hogy a gáz sűrűsége a csillagtól mért távolsággal csökken, és ez kifelé mutató nyomásgradienst okoz. Így a gázra nemcsak a csillag vonzóereje hat, hanem a csillagtól kifelé mutató nyomóerő is. Ezért a gáz keringési sebessége

$$v_g = v_K \sqrt{1 - n \left(\frac{c_s}{v_K} \right)^2}$$

lesz, ahol $\Sigma \sim R^{-1.5}$ a gáz felületi sűrűsége, v_K a Kepler-körsebesség. A gáz keringési sebessége közelítőleg 0,2%-kal lesz kisebb, mint a körpálya sebessége, tehát a porszemcsék és a gáz közötti sebességkülönbség hatására a porra áramlásával ellentétes irányú fékezőerő hat. Ennek két fontos következménye van: a porszemcsék vertikális ülepedése és csillag felé áramlása.

A porszemcsék süllyedni kezdenek a korong síkja felé, mivel a csillag gravitációs vonzása következtében vertikális irányú erő hat rájuk. Az ülepedés állandó sebességű, mert a por süllyedését fékezni igyekszik a gázzal történő kölcsönhatás. Részletes számítá-

sok szerint a mikrométeres méretű porszemcsék néhány százezer év alatt teljes egészében lesüllyednek a korong síkjába. A gáz fékezőereje azonban annál nagyobb, minél nagyobb a porszemcse, így az eltérő méretű porszemcsék más-más sebességgel ülepednek. Ennek következtében a porszemcsék kis ütközési sebesség esetén összetapadnak, míg nagy ütközési sebesség esetén szétaprózódnak. Az azonos méretű porszemcsék jellemzően kis sebességgel, míg az eltérő méretű szemcsék nagy sebességgel ütköznek. Így a mikrométeres porszemcsék mellett milliméteres vagy centiméteres porszemcsék is megjelennek, amelyek méretükkel arányosan, egyre gyorsabban süllyednek a korong fősíkja felé.

A porszemcsék csillag felé történő áramlása azért következik be, mert a gáz által okozott – a légellenállási erőhöz hasonló – súrlódási erő következtében a porszemcsék veszítenek energiájukból, és egyre kisebb sugarú pályára kényszerülnek. A mikrométeres porszemcsék mozgása még szorosan csatolódik a protoplanetáris korongbeli gáz csillagkörtüli áramlásához, de a mm-es, illetve cm-es szemcsék azimutális sebessége kisebb lesz a gázénál. A szemcseméret növekedésével a gáz és a por relatív sebessége egy bizonyos mérettartományig növekszik, felette újra csökken. Ez a sebességkülönbség egy átlagos protoplanetáris korong 1–10 CSE tartományában a deciméteres és méteres nagyságú porképződményekre (planetezimálok) lesz maximális. A rájuk ható fékezőerő olyan nagy, hogy a csillag néhány ezer év alatt 10 CSE távolságból elnyelné őket. A deciméteres és méteres planetezimálok gyors eltűnése komoly problémát jelenthet a bolygókeletkezés szempontjából, hiszen ha a méretnövekedés nem elegendően gyors folyamat, akkor nem marad elegendő mennyiségű szilárd anyag a bolygók képződéséhez.

További probléma, hogy a növekvő szemcseméret egyre nagyobb ütközési sebességet okoz. A maximális radiális sebességgel befelé áramló szemcsék átlagos ütközési sebessége elérheti a 30 m/s-ot. Ilyen ütközési sebesség esetén azonban nehéz elképzelni, hogy a szemcsék összetapadjanak, ellenkezőleg, inkább szétaprózódnak. A szemcsék koagulációját leíró integrodifferenciál-egyenletek (Marian Smoluchowski lengyel fizikus 1916-os publikációjában jelenik meg először) megoldásai arra az eredményre vezettek, hogy egészen 100 m/s ütközési sebességig van némi esély arra, hogy a protoplanetáris korong szemcséi elérjék a néhány milliméteres átmérőt. Nagyobb méretű szemcsék ütközésénél azonban már a 10 m/s-os sebesség is azok széteséséhez vezet. Ha a szemcsék szerkezete porózus, vagy jég borítja a felszínüket, abban az esetben hatékonyan tudják adszorbeálni az ütközési energiát 10–20 m/s sebességig.

Planetezimálok kialakulása

Szafronov már 1964-ben, tőle függetlenül pedig Goldreich és Ward 1973-ban felvetették annak lehetőségét, hogy a korong síkjában felhalmozódó nagy mennyiségű

gű por gravitációsan instabillá válhat. Lineáris stabilitásanalízis szerint, ha a por Σ_d felületi sűrűségére felirt Toomre-kritériumnak megfelelően

$$\frac{c_s}{\pi G \Sigma_d} \leq 1$$

teljesül, akkor nagyjából $3 \cdot 10^{18}$ g tömegű, 10-20 km-es méretű planetézimálok jöhetnek létre. Mivel a korongban csak 1%-nyi por van, a gravitációs instabilitáshoz rendkívül vékony porkorongra, a korong eredeti vastagságának tízezrednyi részére van szükség. Viszont a gáz Kelvin–Helmholtz-instabilitása miatt a gázban turbulenciák jelennek meg, ami megakadályozza a kellően vékony porréteg kialakulását.

Újabb numerikus vizsgálatok megmutatták, hogy a porszemcsék csomósodásai a gázzal kölcsönhatva olyan turbulenciákat keltenek, amelyekben a szemcseméret növekedése felgyorsul, és rövid idő alatt akár 100-1000 km átmérőjű planetézimálok keletkezhetnek. A planetézimálok effajta növekedését gravoturbulens planetézimálokagulációnak nevezzük, amelyben a deciméteres és méteres szemcsék csillag által történő elnyelődése elkerülhető az igen gyors szemcsenövekedés révén.

A Naprendszerben felfedezett kis égitestek, az aszteroidák vagy a Földre hulló meteoritok az egykori planetézimálok ütközése során keletkezettek. Ezért, bár sok még a kérdőjel a planetézimálok keletkezésével kapcsolatban, a Naprendszer kis égitesteinek létezése alátámasztja azt a hipotézist, hogy a planetézimáloknak százezer évnél rövidebb idő alatt kellett létrejönniük.

Föld-szerű kőzetbolygók kialakulása

A planetézimálok kölcsönös ütközéseik révén egyre nagyobb testekké, bolygócsírákká állnak össze. Ezt az teszi lehetővé, hogy a planetézimálok olyan pályán keletkeznek, amelyek excentricitása és inklinációja (pályahajlás a korong fősíkjához képest) nullától eltérő. Minél nagyobb a planetézimálok átlagos excentricitása és pályahajlása, annál gyakrabban keresztezik egymás pályáját keringésük során. Szoros megközelítések esetén a kölcsönös gravitációs vonzás hatására megnő az ütközési gyakoriság. Ennek következtében minél nagyobb egy planetézimál tömege, annál gyakrabban ütközik más planetézimálokkal, és tömege annál gyorsabban nő. Ez azt eredményezi, hogy a tömegnövekedés

$$M(t) = \frac{1}{(M_0^{-1/3} - kt)^3},$$

ami nem exponenciális, de egyre gyorsuló ütemű.

A néhány száz kilométeres planetézimálok saját gravitációs összetartó ereje elegendően nagy ahhoz, hogy két ekkora test ütközése során a keletkező kisebb darabok ne távolodjanak el egymástól, hanem gravitációsan kötött égitestet alkossanak. Ésszerű te-

hát azt feltételeznünk, hogy a planetézimálok ütközésekor tömegük nagy része egyesül. Növekedésüket lényegében csak a gravitációs erő befolyásolja, ugyanis a korongban jelen levő gáz fékezőereje az ekkora méretű testekre már elhanyagolható. Ennek ellenére a kőzetbolygók kialakulásának modellezése komoly kihívás, mivel elképesztően nagyszámú, közel 10^9 , átlagosan 5 km nagyságú planetézimál kölcsönös gravitációjának hatását (ami $3 \cdot 10^{18}$ erőkomponens kiszámítását jelenti) kell szimultán meghatározni.

A tömegnövekedés nem korlátlan, mert előbb-utóbb kiürül a bolygócsíra környezete, és nem tud újabb planetézimálokat elnyelni. Az a tartomány, ahonnan egy bolygócsíra képes egyáltalán planetézimálokat elnyelni, nagyjából megegyezik a pályája mentén elhelyezkedő

$$R_H = a_{pl} \left(\frac{m_{pl}}{M_\star} \right)^{1/3}$$

Hill-sugár vastagságú gyűrűvel, ahol a_{pl} és m_{pl} a bolygócsíra pályasugara és tömege. A gyűrű mérete nem lineárisan növekszik a tömeggel, így a benne lévő, még elnyelhető planetézimálok össztömege sem. Azaz létezik egy maximális tömeg, az izolációs tömeg, legfeljebb ekkorára nőhet meg egy bolygócsíra. Ennek nagysága

$$M_{izo} = C M_\star^{-1/2} \Sigma_{pl}^{3/2} a_{pl}^3,$$

ahol $C \approx 165$, Σ_{pl} a planetézimálok kezdeti sűrűsége a bolygócsíra keringési távolságán. A Naprendszer kezdeti állapotának megfelelő protoplanetáris korongban, a Föld távolságában ez csupán 0,07 Föld-tömeg (M_\oplus), míg a Jupiter távolságában már 9 M_\oplus lenne.

A kőzetbolygók keletkezése tehát gyors növekedéssel indul, ehhez az anyagot a 100-1000 km-es planetézimálok szolgáltatják. A bolygócsírák méretnövekedése megáll, amint elemésztették a pályáik közelében keringő planetézimálokat, így 10^5 - 10^6 év elteltével nagyjából 0,01-0,1 M_\oplus tömegű, közel 10 Hill-sugár átlagos szeparációjú testek keletkeznek (6. ábra színesben a hátsó belső borítón).

Ezt követően a bolygócsírák már nem izoláltan fejlődnek, hanem perturbálják egymás pályáját, aminek eredményeként összeütköznek és egybeolvadnak, vagy kiszórják egymást a korongból. Ez egy több tízmillió évig tartó kaotikus folyamat, azaz közel azonos kezdőfeltételek esetén a bolygórendszer végső szerkezete lényegesen eltérő lehet. Így ahhoz, hogy az elméletet összevessük a Naprendszer vagy a távoli csillagok körül megfigyelt bolygórendszerek szerkezetével, számos N-test-szimulációban kialakuló (a 6. ábrán bemutatott modellekhez hasonló) bolygók konfiguráció statisztikus átlagát kell vennünk.

Az utóbbi évtizedben végzett elméleti kutatások feltárták, hogy a kőzetbolygók kialakulása erőteljesen függ a planetézimálok kezdeti Σ_{pl} sűrűségétől: nagyobb planetézimálsűrűség általában kevesebb és

nagyobb tömegű kőzetbolygó kialakulását eredményezi. A Naprendszer kialakulását szimuláló numerikus modell (Nice-modell) csak abban az esetben adja vissza a megfigyelt szerkezetet, ha a bolygócsírák keletkezését követően már jelen vannak a Naprendszer óriásbolygói. Ez érthető, hiszen az óriásbolygók erősen perturbálhatták a kaotikus bolygórendszert, kialakítva a kőzetbolygók ma megfigyelhető alacsony excentricitású és inklinációjú pályáit. Újabb vizsgálatok szerint a Jupiter és Szaturnusz együttes, először a csillag felé történő, majd a Mars pályájánál megforduló, kifelé történő migrációja (Grand Tack-modell) szükséges ahhoz, hogy a Mars a ma megfigyelhető helyen és $0,1 M_{\oplus}$ tömeggel keletkezzen. A modell segítségével azt is meg tudjuk magyarázni, hogy a Naprendszer távolabbi régióiból az óriásbolygók perturbációi révén miként jutott el az életet adó víz a protoplanetáris korongnak a Föld keringési távolságán elhelyezkedő, vízben szegény tartományába.

Óriásbolygók kialakulása

Naprendszerünkben az óriásbolygók tömege $0,05-1 M_{Jup}$ Jupiter-tömegnyi (M_{Jup}), míg a távoli csillagok körül akár $10 M_{Jup}$ óriásbolygók is keringenek. A Naprendszer óriásbolygóinak tömegéből azonban csak elenyésző rész a szilárd mag, ami a mérések szerint (az óriásbolygók közelében elhaladó szondák pályájának perturbációjából) a Jupiter és a Szaturnusz esetében <10 és $15 M_{\oplus}$. Mivel a fennmaradó tömeg (például a Jupiter esetében közel $290 M_{\oplus}$) a bolygó gázköpenyében van, az óriásbolygókat gázóriásoknak is nevezzük.

Egy bolygó akkor tud számottevő atmoszférát létrehozni, ha elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy tömegvonzása következtében a gáz ne szökjön el. Ahhoz, hogy egy Nap-tömegű csillag körül keringő bolygó szilárd magjának tömegével összemérhető (legalább 10% -nyi) atmoszférát legyen képes fenntartani, legalább $0,2 M_{\oplus}$ -nek kell lennie.

Az óriásbolygó szilárd magja a korábban bemutatott módon, a planetézimálok akkréciója során növekszik. Mint láttuk, a szilárd mag növekedése az izolációs tömegnél megáll. A Naprendszert létrehozó protoplanetáris korongban a Jupiter jelenlegi keringési távolságában ($5,2$ CSE) az izolációs tömeg $10-15 M_{\oplus}$. Egy ekkora tömegű bolygómag már számottevő nagyságú gázköpenyt gyűjt. A bolygó atmoszférájának növekedése a kezdeti szakaszban még hidrosztatikai egyensúlyban van. Ennek fenntartásához az kell, hogy a planetézimálok becsapódásakor keletkező energiát és az atmoszféra zsugorodásakor felszabaduló gravitációs potenciális energiát az atmoszféra ki tudja sugározni radiatív diffúzió, vagy az atmoszférában zajló konvekció útján.

Amint az atmoszféra tömege eléri a szilárd mag tömegét, nem tud hidrosztatikai egyensúlyban maradni, és összeomlik. Ekkor a bolygó Hill-szférájába hirtelen friss gáz áramlik a korongból, ami növeli a Hill-szféra sugarát, és a gázköpeny növekedése időben

exponenciálissá válik. A tömegnövekedést így már nem az atmoszféra sugárzási képessége, hanem a protoplanetáris korongban lévő gáz mennyisége határozza meg.

Elsőként *James B. Pollack* számította ki 1986-ban egy, a Naprendszer kezdeti protoplanetáris korongjában található Jupiter-tömegű óriásbolygó kialakulását. Számításai szerint a $10 M_{\oplus}$ izolációs tömeget elérő bolygómag mindössze félmillió év alatt alakul ki. Az atmoszféra hidrosztatikus növekedési fázisa – amíg tömege eléri a bolygómag tömegét – majd 7 millió évig tart. Az ezt követő exponenciális tömegnövekedés során a bolygó Jupiter-tömegnyi gázköpenyt gyűjt, mindössze néhány százezer év alatt.

Az óriásbolygók növekedési időskáláját tehát lényegében az atmoszféra hidrosztatikai növekedési fázisa határozza meg, ami

$$\tau \approx 10^8 \frac{\kappa_g}{M_{mag}^{2.5}} \text{ év},$$

ahol M_{mag} a bolygómag M_{\oplus} egységekben, míg κ_g az atmoszféra (lényegében az abban található por) opacitása cm^2/g egységekben. Tehát, ha a gázköpeny opacitása vagy az izolációs tömeg kisebb, akkor az óriásbolygók kialakulása felgyorsulhat.

A Pollack számításain alapuló újabb modellek szerint az óriásbolygók akár 3 millió év alatt is kialakulhatnak, ha a por opacitását a csillagközi anyagban megfigyelt érték 2% -ára csökkentjük. Ha a kezdeti korong tömege jelentősen nagyobb lenne, akkor az izolációs tömeg növekedne, ami ezzel arányosan növelné a kritikus tömeget. Nagyobb planetézimálsűrűség esetén a hidrosztatikai növekedés fázisa felgyorsul, a megnövekedett kritikus tömeget rövidebb idő alatt érné el a bolygómag. Így a nagyobb planetézimálsűrűségű korongban szintén gyorsabban tud kialakulni az óriásbolygó.

A bolygók migrációja

A protoplanetáris korong magas Reynolds-száma miatt a gáz turbulens. A csillag röntgensugárzása, illetve a kozmikus térből érkező gammasugárzás gyengén ionizálja a gázt. A részlegesen ionizált gáz a turbulens áramlás és a csillag mágneses terével történő kölcsönhatás következtében folyamatosan impulzuszórást veszít, ami a gáz lassú áramlását eredményezi a csillag felé. Ez olyan, mintha a protoplanetáris korongbeli gáznak viszkozitása lenne, annak ellenére, hogy a molekuláris viszkozitás elenyésző. Ezért a protoplanetáris korongok a keletkezésüket követő nagyjából 5 millió év alatt eltűnnek, még akkor is, ha anyagukat nem emésztik fel a keletkező bolygók. Ezt mérési eredmények is igazolják, amelyek szerint az észlelhető protoplanetáris korongok száma drasztikusan csökken, ha a központi csillag életkora meghaladja az 5 millió évet. Ezért a még születőben levő bolygók a protoplane-

táris korongjuk gázába ágyazódva keringenek. A korongbeli gáz és a bolygó között történő impulzusmomentum-cserének fontos következményei vannak a bolygók keringési távolsága, excentricitása és pályahajlása tekintetében.

A relatíve kis tömegű bolygók (jellemzően $<10 M_{\oplus}$) és a protoplanetáris korongbeli gáz között létrejövő gravitációs kölcsönhatás miatt spirális alakú, a bolygóval együtt mozgó sűrűség hullám keletkezik (7. ábra színesben a hátsó belső borítón). A sűrűség hullámban felgyülemlett gáz gravitációs hatása viszont visszahat a bolygó mozgására. A bolygónak a pályáján belül, illetve azon kívül keringő spirális anyag-többség impulzusmomentumot ad vagy vesz el. A pályasugár az impulzusmomentum változásának előjelétől függően nő vagy csökken. Részletes vizsgálatok szerint jellemzően a bolygópálya mérete csökken. Ha azonban a gáz elegendően lassan hűl, akkor a korábbiól kissé eltérő szerkezetű spirálhullámok alakulnak ki. Ez esetben a bolygók kifelé is migrálhatnak, de csak a korong belső (<5 CSE) tartományában.

A kis tömegű bolygók I. típusú migrációját leíró elmélet szerint a pályasugár csökkenése,

$$\frac{da}{dt} \sim \frac{a^{3/2}}{b^2} \frac{M_p}{M_{\star}} \Sigma_g.$$

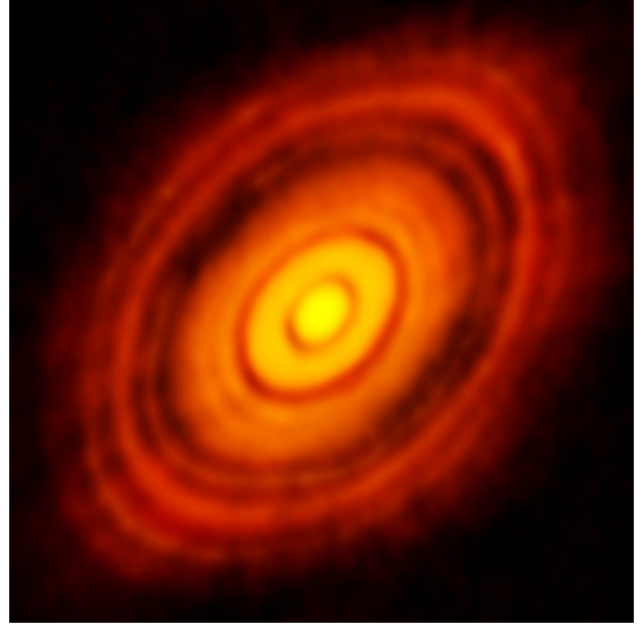
A bolygómigráció annál gyorsabb, minél nagyobb a bolygó és/vagy a korong tömege, a korong vastagsága, vagy minél távolabb kering a bolygó a csillagtól. A pályasugár változását megadó differenciálegyenlet numerikus megoldása szerint a kezdetben 5 CSE távolságban keringő 1-15 M_{\oplus} bolygót kevesebb, mint 1 millió év alatt óhatatlanul elnyeli a központi csillag.

Míg a kisebb tömegű bolygó gravitációs perturbációi lényegesen nem változtatják meg a protoplanetáris korong szerkezetét, az óriásbolygók átfomálják azt. Egy Jupiter-tömegű óriásbolygó és a korong közötti impulzusmomentum-csere következtében a bolygón belül keringő gáz impulzusmomentumot veszít, míg a külső tartományokban lévő nyer. Ennek következtében mind a bolygón belül, mind a kívül keringő gáz eltávolodik a bolygópályától, azaz rést nyit a bolygó pályája mentén (8. ábra színesben a hátsó belső borítón). A rés azonban nem növekedhet minden határon túl, mert a gáz viszkozitása ezt megakadályozza. A rés annál szélesebb lesz, minél nagyobb a bolygó tömege, illetve minél kisebb a gáz effektív viszkozitása. A spirálhullámok nem képesek lényeges mértékben megváltoztatni a nagy tömegű bolygó impulzusmomentumát. Viszont a korong viszkozitása jóval nagyobb, mint azt a molekuláris viszkozitás eredményezné, így a gáz folyamatosan áramlik a csillag felé, magával sodorva az óriásbolygót.

Az óriásbolygók II. típusú migrációját leíró elmélet szerint a keringési sugár változása

$$\frac{da}{dt} \sim \frac{\alpha}{a},$$

ahol α a korong effektív viszkozitására jellemző szám.



9. ábra. Az ESO ALMA rádió-interferometriás távcsőrendszerével készült kép a HL Tauri csillag protoplanetáris korongjáról.

Mint látható, bármilyen tömegű óriásbolygó ugyanolyan sebességgel migrál, mert pályasugarának változása független a tömegétől. Viszont minél nagyobb a korong viszkozitása, annál gyorsabban migrál az óriásbolygó. A pályasugár változását megadó differenciálegyenlet numerikus megoldása szerint (feltételezve, hogy a korongbeli gáz effektív viszkozitása $0,001 \leq \alpha \leq 0,01$) a kezdetben 5 CSE távolságban keringő óriásbolygót 1 millió éven belül elnyeli a központi csillag.

A bolygókeletkezés nyitott kérdései

A modern bolygómag-akkréciós elmélet segítségével le tudjuk írni, hogy a protoplanetáris korongok anyagának csupán 1%-át kitevő porszemcsék növekedése következtében hogyan alakulnak ki a Föld-szerű kőzetbolygók és a Naprendszer, illetve a távoli bolygórendszerek óriásbolygói.

De az ördög a részletekben rejlik.

Nem értjük egészen, hogy a bolygók alapvető építőelemei, a méteres nagyságú planetézimálok csillagba történő gyors behullását mi akadályozza meg.

Nem világos, hogyan jöhetnek létre az óriásbolygók olyan rövid idő alatt, amennyi rendelkezésükre áll a korong mindössze 5 millió éves élettartama alatt. A ma ismert elméletek szerint a kis és nagy tömegű bolygókat migrációjuk következtében szülőcsillaguk óhatatlanul elnyelné. Vajon mi menti meg őket?

Egyelőre megválaszolatlan kérdés az is, hogy a kettős csillagrendszerekben megfigyelt bolygók hogyan tudtak létrejönni. A kísérőcsillag ugyanis oly mértékben perturbálja a porszemcsék pályáit, hogy ütközésük (a megnövekedett pályaeccentricitás miatt) túl nagy sebességgel történik ahhoz, hogy összetá-

padjanak, megakadályozva a nagyobb méretű plane-
tezimálok kialakulását.

Cikkünk végére hagyunk egy kakukktójást. Az Európai Déli Obszervatórium (ESO) 2014. novemberében tette közzé a HL Tauri csillag körül kialakult, pusztán 1 millió éves protoplanetáris korongról a miliméteres hullámhossztartományban rögzített fényképet¹ (9. ábra). A korongban számos rés látható, de bolygót – se kicsit, se nagyot – egyet sem találtak. Egyáltalán bolygók hozták létre a képen látható réseket? Ha igen, akkor hogyan jöhettek létre ilyen rövid idő alatt?

¹ Folyóiratunk tavaly decemberi címlapján is megtekinthető.

A csillagászati észlelési technikák gyors fejlődésének köszönhetően egyre többet tudunk meg a távoli bolygórendszerekről, de még bőven akad megválaszolandó kérdés. Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetének több kutatócsoportja – a jelen cikksorozat szerzője által vezetett Numerikus Asztrofizika Kutatócsoport munkatársai is – ezen a fiatal tudományterületen végez kutatásokat.

Ajánlott irodalom

Abruzzo, A. J.: The Origins of the Nebular Hypothesis – Or, the Genesis of a Theoretical Cul-de-sac. *The General Science Journal*, 2009. június 15.

Armitage, P.: *Astrophysics of Planet Formation*. Cambridge University Press, 2010.

ATOMERŐMŰVI HULLADÉKOK KEZELÉSE – 2. RÉSZ

Fábián Margit

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Radioaktív hulladékok kezelése

Nemzetközi ajánlásnak megfelelően a radioaktív hulladék mennyiségét a gyakorlatilag elérhető legalacsonyabb szinten kell tartani, amelynek egyik feltétele, hogy már a hulladék keletkezését minimalizálni kell. A radioaktív hulladék-kezelés célja a hulladék mennyiségének, valamint a radioaktív szennyezők mobilitásának a csökkentése.

A radioaktív hulladékok kondicionálása

A kondicionálás célja a hulladék stabilizálása, valamint a hulladékból található szennyezők immobilizálása. Szerepe, hogy szállításra, végleges elhelyezésre alkalmasá tegye a hulladékot. A hulladékot a kondicionálás során aktivitáskoncentrációjuknak megfelelően különböző kötőanyagba ágyazzák, stabil hulladékmátrixot képezve.

Többféle kondicionálási eljárás ismert:

- a cementezés:
 - kis aktivitású hulladék (LLW) esetén betonba öntés,
 - kis és közepes aktivitású hulladék (szerves LLW, ILW) esetén a bitumenbe ágyazás;
- hosszú élettartamú, nagy aktivitású hulladék (HLW) esetén az üvegesítés;
- vagy a kerámiába foglalás.

Cementezés (LLW)

A kis és közepes aktivitású, főleg folyadékállapotú és szilárd radioaktív hulladékok kondicionálására egyik leggyakoribb, jól bevált eljárás az acélhordókba történő cementezés, betonozás. Költséghatékony, alacsony hőmérsékleten való egyszerű előállítási eljárás. A jól ismert technológia olyan mátrixanyagot eredményez,

amely nem éghető, jó termikus stabilitással rendelkezik, kémiai és biokémiai stabil [5].

A beton legegyszerűbben a cement, kavics, víz (folyadék) és adalékok keverékeként definiálható. A technológia lényegi eleme a cement (szervesetlen kristályos anyagkeverék), amely legtöbb esetben klasszikus portlandcement. A gyártás során 75-80% mészkő (kalcium-karbonát) és 20-25% agyag (vizes kalcium-alumínium-szilikát) keverékét zsugorodásig égetik. Ennek a több mint 1400 °C-on végzett kalcinálásnak a terméke a darabos *klinker*, amihez ezután néhány százalékban kötőanyagot adnak. A cement fő kémiai alkotórészei: SiO₂, CaO, Al₂O₃ + H₂O, FeO stb. A teljes tömegre nézve a 20% radioaktív hulladék – 80% cement arány tekintetében átlagosnak. A kondicionált hulladékból lévő cement az immobilizáláson kívül árnyékoló hatást is jelent a radioaktivitás által okozható külső sugárterheléssel szemben. A cement a megkötés során kikristályosodik és közben vizet vesz fel, ami kiváló vízállóságot biztosít, ezt nevezzük szilárdulásnak. A cementezett hulladékot 200/400 literes acélhordókba töltik. A hordó további védelmet jelent, amelyet bentonittal vesznek körbe (a *bentonit* 60-90%-ban montmorillonitot tartalmazó, ásványi eredetű anyag). További összetevők lehetnek: kvarc, krisztobalit, földpátok, muszkovit, biotit, illit, kaolinit, klorit, karbonátok, zeolitok, alumínium-hidroxid, apatit, hematit, limonit, nehézasványok, illetve amorf komponensek – mindez a víz hatására megduzzad, ezzel kitöltve a hordó körüli űrt. Az így kialakult védőréteg kettős funkcióval bír: csillapítja a földmozgások kártékony hatását és megakadályozza, hogy sérülés esetén radioaktív víz kerüljön a talajba. Nagy aktivitású hulladék befogadására kevésbé alkalmas, mert a tartós, nagy hőterheléstől vízvesztés miatt idővel degradálódik.